

REVISION DEL ANALISIS DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA GESTION DE LOS RECURSOS HIDRICOS

REVISION OF THE MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS FOR WATER RESOURCES MANAGEMENT

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

D. HUGO SANDRO LUQUE LUQUE

Dirigido por:

Dr. ANGEL UDIAS

Alcalá de Henares, a 9 de diciembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

A profesores en especial al director del presente TFM, compañeros y personal administrativo del programa de Master en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos de las Universidad de Alcalá de Henares y la Universidad Rey Juan Carlos.

ÍNDICE

RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Análisis de criterios múltiples (MCA)	11
1.2 Tipos de técnicas o enfoques MCA	17
2. OBJETIVO.....	21
3. METODOLOGIA	21
4. DISCUSIÓN.....	21
4.1 Problemática de decisión en recursos hídricos	21
4.2 Métodos y técnicas MCA aplicados a gestión de recursos hídricos	22
4.3 Aplicaciones MCA en gestión de recursos hídricos	25
4.4 Aplicación MCA en combinación o integración con otros métodos	33
4.5 Retos de MCA aplicados a recursos hídricos	35
4.5.1 Enfoques de sistemas blandos y paradigmas alternativos	36
4.5.2 Enfoque integrado para el modelado participativo.....	38
4.6 Futuras direcciones de MCA aplicados a recursos hídricos	38
5. CONCLUSIONES	40
6. BIBLIOGRAFÍA.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Elementos de un problema MCA.....	13
Figura 2 Pasos para formular y resolver un problema discreto de MCA	14
Figura 3 Pasos para formular y resolver un problema continuo de MCA.....	14
Figura 4 Diferentes tipos de aplicaciones MCA.....	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de decisión para un ejemplo de selección de mejor ubicación para construcción de presa en una cuenca.	16
Tabla 2 Aplicaciones de métodos MCA convencional en recursos hídricos	23
Tabla 3 Aplicaciones de método AHP en gestión de recursos naturales de 2009 a 2013 .	24
Tabla 4 Aplicación MCA en campo de políticas y planeamiento de abastecimiento de agua	26
Tabla 5 Aplicación MCA en campo de Selección de Infraestructura	28
Tabla 6 Aplicación MCA en campo de evaluación de proyecto	28
Tabla 7 Aplicación MCA en campo de dotación de agua	29
Tabla 8 Aplicación MCA en campo de gestión de cuenca.....	30
Tabla 9 Clasificación de publicaciones GIS-MCDA de acuerdo al tipo de incertidumbre	36

TABLA DE ABREVIATURAS

AHP: *Analytic Hierarchy Process* (Proceso de Jerarquía Analítica)

ANP: *Analytic Network Process* (Proceso de Red Analítica)

CBA: *Cost-Benefit Analysis* (Análisis de Costo-Beneficio)

CEA: *Cost-Effectiveness Analysis* (Análisis de Costo-Efectividad)

DM: *Decision maker* (Tomadores de decisión)

ELECTRE: *ELimination Et Choix Traduisant la Réalité* (Francés) (Eliminación y elección traduciendo la realidad)

EVAMIX: *EVALuation of MIXed data* (Evaluación de Datos Mixtos)

EXPROM: *EXTension of the PROMethee* (Extensión de PROMETHEE)

GMR: *General Metarationality* (Metaracional General)

GIS: *Geographic Information System* (Sistema de Información Geográfica)

LMS: *Limited-Move Stability* (Estabilidad Movimiento Limitado)

MACBETH: *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*.

(Medición del atractivo mediante una técnica de evaluación basada en categoría)

MADM: *Multi-Attribute Decision Making* (Toma de Decisiones de Atributos Múltiples)

MAUT: *MultiAttribute Utility Theory* (Teoría de Utilidad Multiatributo)

MCA: *Multiple criteria analysis* (Análisis de Criterios Múltiples)

MCDA: *Multiple criteria decision analysis* (Análisis de Decisión de Criterio Múltiple)

MCDM: *Multi-Criteria Decision Making* (Toma de Decisiones con Criterios Múltiples)

MCGT: *Monte-Carlo Game Theory* (Teoría de juegos de Montecarlo)

MCMDM: *Multi-Criteria Multi-Decision Makers* (Múltiples Tomadores de Decisiones de

MCQA: *Multiple Criteria Q-Analysis* (Análisis Q multicriterio)

MOA: *Multi-Objective Analysis* (Análisis de Objetivos Múltiples)

MODM: *Multi-Objective Decision Making* (Toma de Decisiones con Objetivos Múltiples)

MODS: *Multiple-Objective Decision Support* (Soporte de Decisión de Objetivos Múltiples)

PROMETHEE: *Preference Ranking Organization MeTHod for Enrichment Evaluations*

(Método de organización de clasificación de preferencia para evaluaciones de enriquecimiento)

PSM: *Problem Structuring Methods* (Problema de los Métodos de Estructuración)

RDM: *Robust Decision Making* (Toma de decisiones robusta)

SAW: *Simple Additive Weighting* (Ponderado aditivo simple)

TOPSIS: *Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution* (Técnica para la preferencia de orden por similitud con la solución ideal.)

UNESCO: *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*

RESUMEN

La toma de decisiones en el campo de los recursos hídricos a menudo está caracterizada por un gran número de alternativas, consecuencias inciertas, interacciones complejas, y participación de múltiples personas implicadas con intereses conflictivos. En este contexto, desarrollar sistemas y herramientas de apoyo para la toma de decisiones entre múltiples alternativas es una tarea complicada y desafiante.

El análisis de criterios múltiples (MCA) es una metodología para valorar el rendimiento general de las alternativas de decisión cuando se consideran múltiples objetivos y/o criterios. El enfoque en la actualidad tiene amplia y creciente aplicación en el campo de la gestión de los recursos hídricos. En el presente trabajo se realiza una revisión bibliográfica del estado del arte de MCA en el campo de aplicación de la gestión de los recursos hídricos.

La revisión muestra un crecimiento sostenido de aplicación en el campo de recursos hídricos, existen distintos enfoques y métodos MCA de aplicación más usual destacando el análisis de conjuntos difusos, programación de compromiso (CP), proceso de jerarquía analítica (AHP), ELECTRE y PROMETHEE, los criterios de evaluación de alternativas se agrupan usualmente en técnica, social, ambiental y económica. Asimismo, los tipos de aplicación más usuales corresponden a problemas de decisión de evaluación de políticas de agua, planeamiento de abastecimiento de agua, selección de infraestructura y evaluación de proyectos.

Dentro de los desarrollos recientes, se advierte la reducción de incertidumbre y riesgos en la aplicación de métodos MCA, desarrollándose un creciente desarrollo de integración de aplicación MCA en combinación con otros métodos y técnicas a fin de que se constituyan en herramientas de mejor eficiencia y efectividad en la evaluación de problemas de decisión multicriterio. Destacando el de mayor uso combinado el método AHP con otros métodos, asimismo, una combinación recurrente es el uso con GIS, y de un potencial importante se menciona su combinación con análisis costo beneficio (BCA).

Palabras clave: Análisis de criterios múltiples (MCA), gestión de recursos hídricos, problemas de decisión.

1. INTRODUCCIÓN

En general, el análisis de decisiones es la ciencia y arte de diseñar o elegir las mejores alternativas basadas en objetivos y preferencias del tomador de decisiones (DM por sus siglas en inglés), por ejemplo, seleccionar la mejor tecnología para el abastecimiento de agua urbana, desarrollar alternativas de protección contra inundaciones u optimizar la operación de un embalse, son todos **problemas de decisión** (Zarghami & Szidarovszky, 2011). Tomar una decisión implica que hay **alternativas** a tener en cuenta, y en tal caso queremos no solo identificar tantas de estas alternativas como sea posible, sino elegir la que tenga la mayor probabilidad de éxito o efectividad y se ajuste mejor a nuestras metas, deseos, estilo de vida, valores, etc. (Harris, 2012)

Para describir las preferencias de un tomador de decisiones (DM), podemos usar términos de **metas, objetivos, criterios y atributos**, con diferencias sutiles entre sus significados. Las **metas** son útiles para identificar claramente una situación deseada hacia el cual progresar, se relacionan con resultados de desempeño deseados en el futuro, mientras que **objetivo** es algo que se relaciona a alcanzar a su máximo nivel. Los **criterios** son resultados más específicos y medibles. Un criterio es un “objetivo inmediato” de carácter operativo. Los **atributos** y criterios a menudo se usan de forma sinónima en la literatura sobre MCA (Zarghami & Szidarovszky, 2011).

En el presente trabajo, usaremos indistintamente el término criterio, objetivo y atributo, con la salvedad de que criterio y atributo están más cerca del significado de lo que generalmente usan los tomadores de decisiones (DM) en la gestión de recursos hídricos y medio ambiente.

En este contexto general, existen diversas **técnicas, métodos y enfoques de apoyo a la decisión** que tradicionalmente se basan principalmente en una **valoración monetaria** de los impactos de las alternativas. Estas técnicas de valoración monetaria son (Government, Department for Communities and Local, 2009):

- **Análisis Financiero.** Una evaluación del impacto de una alternativa en los propios costos e ingresos financieros de la organización que toma las decisiones.
- **Análisis Costo-Efectividad (CEA).** Una evaluación de costos de las opciones alternativas que logran el mismo objetivo. Los costos no tienen por qué limitarse a los puramente financieros.

- **Análisis Costo-Beneficio (BCA).** Una evaluación de todos los costos y beneficios de las opciones alternativas.

En el caso del **análisis costo-beneficio**, utilizado durante muchas décadas en la planificación de recursos hídricos y gestión ambiental, transformó los diferentes tipos de impactos en una única valoración monetaria. Una vez hecho esto, la tarea era encontrar el plan o política que maximizara la diferencia entre beneficios y costos. Si la diferencia máxima entre beneficios y costos fuera positiva, se suponía que se encontró el mejor plan o política. Sin embargo, no todos los **criterios de rendimiento** del sistema pueden expresarse fácilmente en unidades monetarias, incluso si se utilizan unidades monetarias para describir cada objetivo, entonces no abordan los problemas de distribución de quién se beneficia, quién paga y cuánto (Zarghami & Szidarovszky, 2011).

En la práctica las técnicas de apoyo a la decisión basadas en valoración monetaria, casi nunca es realista toda vez que no siempre es posible valorar todos los costos y beneficios de las alternativas en términos monetarios, puede haber impactos que no se pueden cuantificar fácilmente de una manera que se pueda establecer contra una escala de valores monetarios o quizás no tenga sentido o sea fácilmente criticable, no tiene en cuenta las interacciones entre los diferentes impactos entre otros aspectos limitantes (Government, Department for Communities and Local, 2009).

1.1 Análisis de criterios múltiples (MCA)

Para superar estas limitaciones, en el caso de la gestión de recursos hídricos se aplican técnicas de **análisis de criterios múltiples o decisión multicriterio** que permiten incorporar objetivos **no monetarios** en el marco de decisión, midiéndolos en escalas numéricas o incluyendo descripciones cualitativas de los efectos, sobre todo cuando es necesario considerar las implicaciones **técnicas, ambientales y sociales** de los proyectos relacionados a recursos hídricos, además de considerar criterios **económicos** para garantizar decisiones sostenibles y resultados favorables.

El análisis de criterios múltiples (MCA, por sus siglas en inglés) es una herramienta para evaluar las opciones de decisión contra criterios múltiples (Hajkowicz & Higgins, 2006), que se está utilizando ampliamente en diversos campos relacionados a la gestión de recursos hídricos como la **evaluación de políticas de agua, planificación estratégica y selección de infraestructura**. (Hajkowicz & Collins, 2006).

La amplia variedad de métodos y términos utilizados para referirse a MCA, incluyen en su aspecto más amplio a toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM), toma de decisiones con objetivos múltiples (MODM), análisis de objetivos múltiples (MOA) (Madani & Lund, 2011), soporte de decisión de objetivos múltiples (MODS), toma de decisiones de atributos múltiples (MADM), análisis de decisiones de criterios múltiples (MCDA). Estos **enfoques** comparten los mismos fundamentos teóricos fundamentales y se denominan a este conjunto como análisis de criterios múltiples (**MCA**), que se puede definir como un modelo que contiene (Hajkowicz & Collins, 2006):

- Un conjunto de **opciones o alternativas de decisión** que necesitan ser jerarquizados o puntuados por el tomador de decisión,
- Un conjunto de **criterios**, típicamente medidos en diferentes unidades; y
- Un conjunto de medidas de **rendimiento o desempeño**, que son puntuaciones para cada opción de decisión contra cada criterio.

Por tanto, cualquier problema de decisión enfrentado con MCA tiene **tres componentes** principales: tomadores de decisiones (DM), alternativas y criterios, mostrados esquemáticamente en la Figura 1 y definidos a continuación (Zarghami & Szidarovszky, 2011):

- **Tomadores de decisiones (DM)**. Podría ser una o varias personas responsables de decidir u organizaciones involucradas en el proceso de toma de decisiones. Cuando hay más de un DM presente, pueden tener diferentes criterios, por lo que es probable que ningún resultado de decisión satisfaga a todos los que toman las decisiones por igual. En tales casos, se debe tomar una **decisión colectiva** cuando el resultado depende de cómo los diferentes DM tienen en cuenta los intereses de los demás, es decir, el resultado depende de su disposición a cooperar entre sí.

En el caso de **múltiples tomadores de decisiones (DM)**, podríamos considerar el problema de decisión como un **problema MCA**, donde los criterios de los DM se consideran los **criterios del problema**. En el caso de un único DM y un criterio, tenemos un **problema de optimización** de un solo objetivo. Los métodos aplicados dependen del tipo de problema. Los problemas de decisión típicos de MCA o simplemente en adelante **problemas MCA**, surgen cuando un solo tomador de decisiones considera varios criterios simultáneamente.

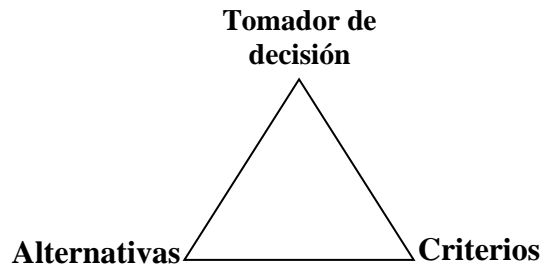


Figura 1 Elementos de un problema MCA

(Zarghami & Szidarovszky, 2011)

En caso existan prioridades y deseos en conflicto de los DM, se puede utilizar la **teoría de juegos**, sin embargo, MCA a menudo se considera como la metodología más poderosa para resolver problemas teóricos del juego con jugadores cooperantes.

- **Alternativas.** Son las posibilidades que uno tiene para elegir. Las alternativas pueden ser identificadas (es decir, buscadas y ubicadas) o incluso desarrolladas (creadas donde no existían previamente). El conjunto de todas las alternativas posibles se denomina **espacio de decisión**. En muchos casos, el espacio de decisión tiene un número finito de elementos. Por ejemplo, seleccionar una tecnología entre cuatro posibilidades da como resultado un espacio de decisión con cuatro alternativas. En otros casos, las alternativas se caracterizan por variables de decisión continuas que representan ciertos valores sobre los cuales se debe tomar la decisión. Por ejemplo, la capacidad del depósito puede ser cualquier valor real entre el valor más pequeño y mayor posible.

En relación a los tipos de alternativas, tenemos dos clases principales de problemas de MCA (Zarghami & Szidarovszky, 2011):

- **Caso discreto.** Si el espacio de decisión (conjunto de alternativas posibles) es finito, entonces la construcción del espacio de decisión factible es muy simple. Tenemos que verificar la viabilidad de cada alternativa determinando si cumple o no con todas las restricciones. Podemos mostrar las alternativas discretas, criterios y evaluaciones de las alternativas con respecto a los criterios en una matriz, llamada **matriz de evaluación o decisión**, donde el elemento (i, j) indica la evaluación de la alternativa j con respecto al criterio i .

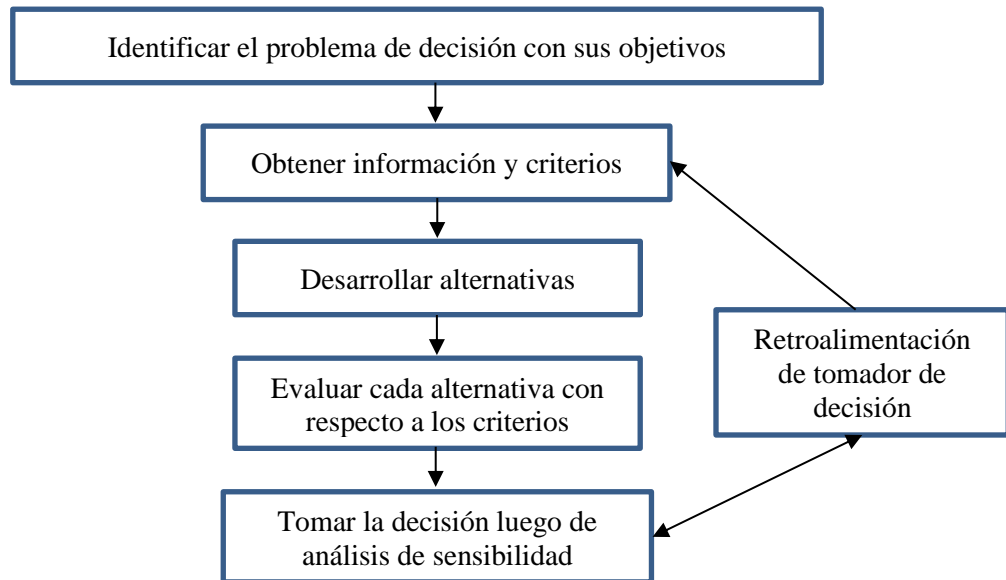


Figura 2 Pasos para formular y resolver un **problema discreto** de MCA
Adaptado de Zarghami & Szidarovszky (2011)

- **Caso continuo.** Si las alternativas de decisión se caracterizan por variables continuas, entonces el problema de decisión enfrentado se considera continuo. En este caso, las alternativas que satisfacen todas las restricciones son factibles, y el conjunto de todas las alternativas factibles es el espacio de decisión factible.

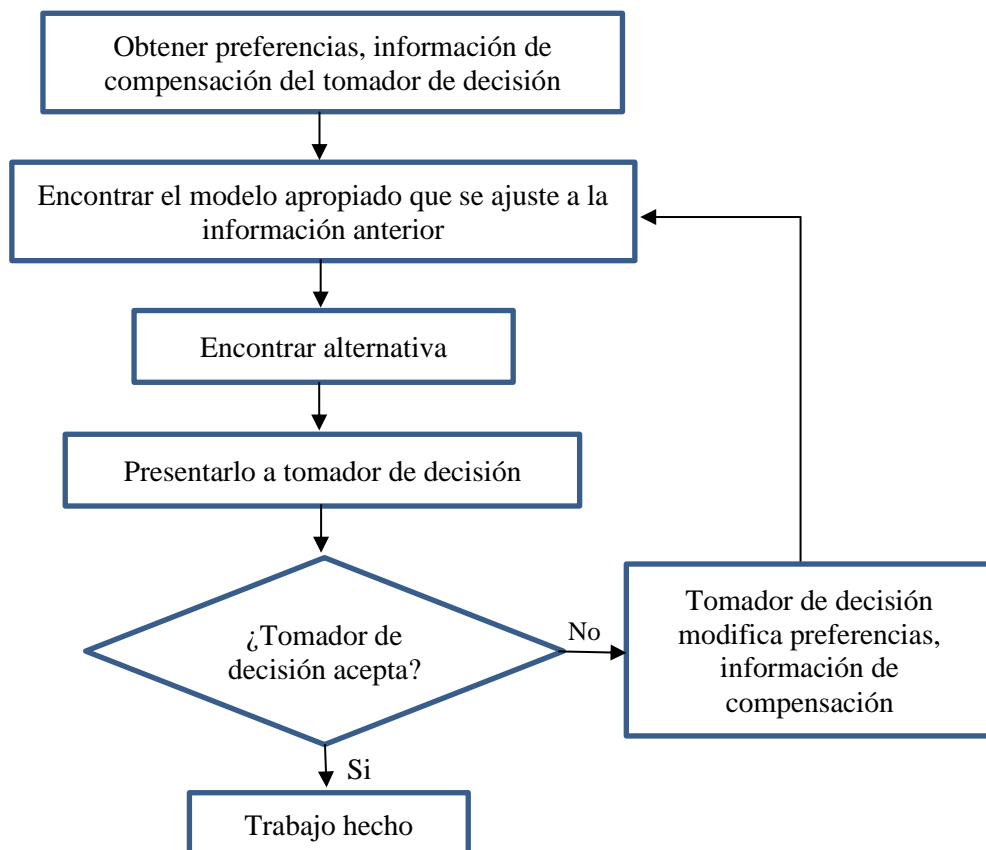


Figura 3 Pasos para formular y resolver un **problema continuo** de MCA
Adaptado de Zarghami & Szidarovszky (2011)

- **Criterios.** Estas son las **características o requisitos que cada alternativa** debe poseer en mayor o menor medida. Las alternativas generalmente se evalúan según cuán bien poseen los criterios.

Como tenemos que elegir entre un conjunto dado de alternativas factibles, necesitamos medir qué tan buenas son esas alternativas. La bondad de cualquier alternativa puede caracterizarse por sus evaluaciones con respecto a los criterios. Estas evaluaciones pueden describirse mediante números claros, valores lingüísticos, números aleatorios o difusos.

Por otro lado, los tres **tipos de problemas de decisión** al cual originalmente se enfrentan MCA son (Chen, 2006):

- a) **“Screening”**: Reducir un gran conjunto de alternativas a un conjunto más pequeño que probablemente contenga la mejor alternativa.
- b) **“Sorting”**: Organizar las alternativas en algunos grupos en orden de preferencia, de modo que el tomador de decisión pueda administrarlas de manera más efectiva.
- c) **Clasificación nominal**: Asignar alternativas a grupos nominales estructurados por el tomador de decisión, de modo que el número de grupos y características de cada grupo, parezcan apropiados para el tomador de decisión.

Es necesario precisar que el **propósito de MCA** es servir como una ayuda para pensar y tomar decisiones, pero no para tomar la decisión, donde una aplicación completa de problema de decisión enfrentado con MCA normalmente implica **ocho pasos** generales resumidos a continuación (Government, Department for Communities and Local, 2009):

1. Establecer el **contexto** de decisión.
2. Identificar las **opciones**.
3. Identificar los objetivos y **criterios** asociados con las consecuencias de cada opción.
4. Describir el **desempeño** esperado de cada opción contra los criterios.
5. Asignar **pesos (ponderaciones)** para cada uno de los criterios.
6. Combinar pesos y puntuaciones para las opciones y obtener el valor general.
7. Examinar los **resultados**.
8. Realizar análisis de **sensibilidad** de resultados por cambio en puntaje o ponderaciones.

En relación a lo anterior, un aspecto importante corresponde a la **asignación de**

puntuaciones y pesos para cada uno de los criterios considerados, las técnicas de MCA comúnmente aplican el análisis numérico a una matriz de rendimiento o desempeño en dos etapas (Government, Department for Communities and Local, 2009):

1. **Puntuación:** a las consecuencias esperadas de cada alternativa se les asigna una puntuación numérica en una escala de **fuerza de preferencia** para cada alternativa para cada criterio. Las alternativas favoritas puntúan más alto en la escala, y las alternativas con menor idoneidad puntúan más bajo. En la práctica, las escalas de 0 a 100 se usan a menudo, donde 0 representa una alternativa real o hipotética menos preferida, y 100 se asocia con una alternativa real o hipotética más preferida.

Tabla 1 Matriz de decisión para un ejemplo de selección de mejor ubicación para construcción de presa en una cuenca.

Criterios	Pesos	Alternativas			
		A1	A2	A3	A4
C1: Beneficio Neto (millones de dólares)	0.2	99.6	85.7	101.1	95.1
C2: Número de beneficiarios (miles de personas)	0.3	4	19	40	50
C3: Estabilidad Geológica (Escala entre 0 y 100)	0.5	70	50	10	20

Adaptado de Zarghami & Szidarovszky (2011)

La **escala relativa** es particularmente apropiada para comparar varias alternativas presentadas al mismo tiempo. A veces, sin embargo, las alternativas se evalúan en serie, por lo que se requiere una comparación con un estándar. A menudo es útil usar **escalas fijas** para estos casos, donde el punto cero en un criterio dado podría definirse como el valor más bajo que sería aceptable, por lo que cualquier alternativa que obtenga menos será rechazada de manera absoluta, independientemente de sus calificaciones en otros criterios.

Se pueden necesitar varias iteraciones hasta que los actores clave sientan que hay suficiente coherencia en sus preferencias. El proceso de modelado ayuda a las personas a alcanzar ese objetivo; no se requiere consistencia para comenzar.

2. **Pesos o ponderación:** Los pesos numéricos se asignan para definir, para cada criterio, las **valoraciones relativas** que reflejan su **importancia relativa** en la decisión. Se puede usar cualquier número para los pesos siempre que sus proporciones se representen de manera **consistente**.

El proceso de establecer los pesos es **fundamental** para la efectividad de un MCA. A menudo se obtendrán de las opiniones de las partes interesadas o personas clave, donde los pesos se derivan individualmente, luego se comparan, con una oportunidad de **reflexión y cambio**, seguida de un amplio **consenso**. Si no hay un consenso, entonces sería mejor tomar dos o más conjuntos de pesos en paralelo. Incluso si no se tiene un acuerdo, el conocimiento explícito de los diferentes conjuntos de pesos y sus consecuencias puede facilitar la búsqueda adicional de un compromiso aceptable.

En MCA, el significado de peso, es razonablemente claro y no ambiguo. El concepto de "peso o ponderación" adquiere diferentes significados con otros **métodos de MCA** utilizados. Siempre hay que tener cuidado.

Otro aspecto relacionado a los pasos generales de problemas de decisión enfrentados con MCA, es el **análisis de sensibilidad** que proporciona un medio para examinar hasta qué punto la vaguedad sobre las aportaciones o desacuerdos entre las personas interesadas y clave hace una diferencia en los resultados generales finales. Especialmente para la evaluación de esquemas o proyectos que atraen el interés público, la **elección de los pesos puede ser discutible**. La experiencia demuestra que MCA puede ayudar a los tomadores de decisiones a alcanzar soluciones más satisfactorias en estas situaciones.

Dentro de la generalidad señalada, existirán métodos de análisis de criterios múltiples, que cubren una amplia gama de enfoques bastante distintos por lo que los pasos de aplicación completa de problema de decisión enfrentado con MCA variaran o serán adaptados según el **método aplicado de MCA**.

1.2 Tipos de técnicas o enfoques MCA

Desde la década de 1960, han surgido muchas técnicas para "resolver" un problema MCA. Una descripción detallada de todos está más allá del alcance del presente trabajo. Algunas de las principales técnicas de MCA encontradas se clasifican de la siguiente manera (Hajkowicz & Collins, 2006):

- a. **Funciones de valor de criterios múltiples.** Dos funciones de valor comúnmente aplicadas son la suma ponderada y multiplicación ponderada. La suma ponderada es normalmente expresada como:

$$u_i = \sum_{j=1}^m v_{i,j} w_j$$

Los pesos (w_j) no son negativos y suman 1, y $v_{i,j}$ es una puntuación de rendimiento transformada para $x_{i,j}$ en una escala de 0 a 1 donde 1 representa el mejor rendimiento. La puntuación de rendimiento general para cada opción está dada por u_i .

- b. Enfoques de superación “outranking”.** Los métodos MCA que han evolucionado utilizan la superación para **eliminar alternativas** que en un sentido particular, están "**dominadas**", la dominación dentro del marco de referencia de superación, utiliza **pesos** para dar más influencia a algunos criterios que a otros. Por lo que en particular se reduce las alternativas que tienen un mal desempeño en cualquier criterio. Puede ser una herramienta efectiva para explorar cómo se forman las preferencias entre las alternativas (Government, Department for Communities and Local, 2009).

Los métodos de PROMETHEE y ELECTRE son dos enfoques de superación comúnmente aplicados. Implican identificar cada par de alternativas de decisión i e i' dando $n^2 - n$ pares en total. Los enfoques de superación aplican algún tipo de función de utilidad, que contiene ponderaciones de criterios, para determinar la cantidad de alternativas i que supera a i' . Se han realizado variaciones considerables a los métodos ELECTRE y PROMETHEE a lo largo del tiempo (Hajkowicz & Collins, 2006).

En relación al método PROMETHEE (proveniente del inglés “Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations”) utilizado con mayor frecuencia en recursos hídricos, fue introducido por primera vez por Brans, Vincke y Mareschal en 1986, desde entonces se ha utilizado ampliamente. El método PROMETHEE I solo clasifica las alternativas **parcialmente**, el método PROMETHEE II, realiza clasificación **completa** de las alternativas. En el método PROMETHEE III, la clasificación final se realiza en función de los intervalos. El método PROMETHEE tiene las siguientes características (Alinezhad & Khalili, 2019): pertenece a los métodos compensatorios; convierte atributos cualitativos en cuantitativos; y no es necesario la independencia de los atributos.

- c. Métodos de distancia a punto ideal.** Estos enfoques identifican valores “**ideales**” y “**anti-ideales**” para los criterios. Luego identifican las opciones de decisión más

cercanas al ideal y más alejadas del anti-ideal. Cuando no se define fácilmente un ideal o anti-ideal, se pueden utilizar los valores de **criterio mínimo y máximo**. Dos técnicas comunes de este tipo son la programación de compromiso (CP) introducido por Yu y Zeleny en 1973 (Ringuest, 1992) y TOPSIS3 introducido por Hwang and Yoon en 1981 (Lai et al, 1994).

- d. Comparaciones por pares.** Las comparaciones por pares se usan en la práctica como un medio para establecer información sobre la importancia relativa de los criterios y el rendimiento relativo de las opciones, permite realizar algunas verificaciones cruzadas (Government, Department for Communities and Local, 2009).

Una de las técnicas de comparación por pares más ampliamente aplicadas es el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) desarrollado por Saaty en 1971 (Saaty, 1987). En AHP, usualmente, se les pide a los tomadores de decisiones que expresen preferencia por un criterio / alternativa sobre otro en cada par en una escala de nueve puntos.

Otro método, corresponde al método de Proceso de Red Analítica (ANP) introducido por Saaty en 1980 (Saaty & Vargas, 2013), en este método, se analiza un problema de toma de decisiones en varios niveles diferentes, y la suma de estos niveles de toma de decisiones forma una jerarquía. El ANP puede considerar todo tipo de dependencias y problemas de interdependencia, y la retroalimentación entre atributos y alternativas (Hajkowicz & Collins, 2006). En esta técnica, la estructura de red se especifica primero. Los tomadores de decisiones (DM) determinan el objetivo, criterios, sub-criterios y alternativas como una estructura de red (Alinezhad & Khalili, 2019).

Otra técnica, es el método de medición del atractivo mediante un método de evaluación técnica basada en categórica (MACBETH), introducido por Bana e Costa y Vansnick en 1994 (Bana e Costa & Vansnick, 1997), analiza las alternativas con múltiples atributos y objetivos opuestos. De hecho, este método interactivo es apropiado con el propósito de examinar y clasificar alternativas a una amplia gama de atributos cualitativos y cuantitativos (Alinezhad & Khalili, 2019).

- e. Análisis de conjuntos difusos.** La teoría de conjuntos difusos fue utilizada por primera vez por Zadeh (1965) en el desarrollo de modelos de apoyo a la decisión.

Una respuesta diferente a la **imprecisión** que rodea a gran parte de los datos en los que se basa la toma de decisiones públicas ha sido observar el campo en desarrollo de conjuntos difusos para proporcionar una base para los modelos de toma de decisiones.

Los conjuntos difusos intentan captar la idea de que nuestro lenguaje natural al discutir temas **no es preciso**. Las alternativas son "bastante atractivas" desde un punto de vista particular o "bastante desfavorables", no simplemente "atractivas" o "desfavorables". La aritmética difusa intenta capturar estas evaluaciones calificadas utilizando la idea de una función de membresía, a través de la cual una alternativa pertenecería al conjunto de alternativas "atractivas" con un grado dado de membresía, entre 0 y 1 (Government, Department for Communities and Local, 2009).

- f. **Métodos a medida.** La capacidad de crear nuevos métodos MCA basados en adaptaciones de los existentes, o el desarrollo de nuevos algoritmos es prácticamente ilimitada (Hajkowicz & Collins, 2006). Por ejemplo, Hyde et al. (2004) adaptan la suma ponderada para crear un "enfoque basado en la confiabilidad" para MCA que implica el uso de coeficientes de correlación de rango.

Se advierte que hay muchos enfoques y técnicas de MCA aplicados a diversos campos y su número sigue aumentando, las **ventajas** más importantes de usar estos enfoques MCA en el campo de la gestión de los **recursos hídricos** son (Zarghami & Szidarovszky, 2011):

- Hacer frente a recursos limitados de agua, financieros y humanos.
- Permitir la combinación de múltiples criterios en lugar de un solo criterio.
- Para evitar costos de oportunidad de demora en la toma de decisiones
- Resolver conflictos entre las partes interesadas.
- Simplificar la administración de los proyectos.

En resumen, el análisis de criterios múltiples (MCA) es tanto un enfoque como un conjunto de técnicas, con el objetivo de proporcionar un orden general de opciones o alternativas, desde la opción favorita hasta la menos preferida. Las opciones pueden diferir en la medida en que logran varios objetivos en conflicto, y ninguna opción será obviamente la mejor para lograr todos los objetivos. Además, algunos conflictos o compensaciones suelen ser evidentes entre los objetivos; Las opciones que son más

beneficiosas también suelen ser más costosas (Government, Department for Communities and Local, 2009).

El enfoque en la actualidad tiene amplia y creciente aplicación en el campo de la gestión de los recursos hídricos. En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica del estado del arte en el campo de aplicación de la gestión de los recursos hídricos.

2. OBJETIVO

El análisis de criterios múltiples (MCA) es una herramienta para clasificar o ponderar el desempeño general de las alternativas de decisión frente a múltiples criterios. El enfoque tiene una aplicación generalizada y creciente en el campo de la gestión de los recursos hídricos (Hajkowicz & Collins, 2006).

El objetivo principal de este trabajo es realizar una revisión del estado de arte de aplicación de técnicas de análisis de criterios múltiples (MCA) en el campo de la gestión de los recursos hídricos.

3. METODOLOGIA

Se realizó una revisión bibliográfica, literatura y artículos publicados relacionados con el uso de enfoques, técnicas y modelos de análisis de criterios múltiples (MCA) de aplicación más usual en el campo de los recursos hídricos.

Asimismo, se revisó bibliografía relacionada con métodos de aplicación de reciente desarrollo y su empleo en este campo de aplicación, así como las tendencias de las mismas hacia el futuro.

4. DISCUSIÓN

4.1 Problemática de decisión en recursos hídricos

Actualmente, la **gestión de recursos hídricos** debe comprenderse con enfoque integrado, donde su evaluación es fundamental para una eficaz toma de decisiones (UNESCO, 2003), al respecto, para tomar buenas decisiones en la gestión de este recurso es necesaria una comprensión detallada de cómo funciona y se comporta el sistema del agua, asimismo, para comprender las implicaciones de estas decisiones, es esencial

comprender el sistema humano y físico acoplado (Serrat-Capdevila, Valdes, & Gupta, 2011), sin embargo, la toma de decisiones no es fácil, debido a que la gestión de recursos hídricos es complicada, envuelve impactos socio-económicos y ambientales, así como varios factores de índole natural y disturbios humanos, por ejemplo, las cuencas hidrográficas como unidad de gestión del recurso hídrico están usualmente caracterizadas por incertidumbres asociados con ingresos hidrológicos exógenos y patrones de demanda humana en el futuro (Weng, Huang, & Li, 2010).

Por otro lado, la importancia y gran escala de proyectos relativos a los recursos hídricos, las inversiones necesarias, la dificultad en predecir los resultados, y el carácter irreversible de las decisiones, han ocasionado que la toma de decisiones llegue a ser un proceso científico complejo (Alamanos et al, 2018), asimismo, las situaciones de toma de decisiones del recurso de agua están a menudo caracterizadas por un gran número de alternativas, consecuencias inciertas, interacciones complejas, y participación de múltiples personas interesadas con intereses conflictivos. En el pasado, las soluciones para suavizar problemas de toma de decisiones del recurso se han basado en el objetivo fundamental de aumentar al máximo la proporción de beneficios para los costos usando enfoques de análisis de costo-beneficio (BCA) (Hyde, Maier, & Colby, 2005).

Por lo tanto, debido a que las decisiones en todos los niveles pueden afectar el recurso en su totalidad, éstas deberán ser coherentes entre sí para ser efectivas (Sadoff & Muller, 2010), por lo que desarrollar sistemas de apoyo para la toma de decisiones entre alternativas para aplicaciones ambientales y en particular en recursos hídricos es una tarea intrincada y desafiante, por su creciente complejidad, el número creciente de temas y criterios que involucran, competencia entre decisiones conflictivas de intereses y dificultad de un soporte de decisión. En este contexto, los sistemas, metodologías y enfoques de apoyo para la toma de decisiones entre alternativas de múltiples objetivos han sido desarrollados desde los 70s para ayudar a abordar problemas semiestructurados y no estructurados de toma de decisión (Mysiak, Giupponi, & Rosato, 2005).

4.2 Métodos y técnicas MCA aplicados a gestión de recursos hídricos

En aplicaciones generales, los enfoques, métodos y técnicas de MCA se están utilizando ampliamente en diversos campos de aplicación, al respecto, Wallenius et al (2008) encontró **6910 publicaciones** que incluían una amplia gama de disciplinas entre **1970 a 2006** usando variaciones de palabras clave: decisión de criterios múltiples, utilidad de atributos múltiples, programación/optimización de objetivos múltiples, programación de

objetivos, AHP, multiobjetivo evolutivo/genético y optimización de vectores, al respecto, de la revisión de publicaciones por áreas de aplicación, se mostró 689 publicaciones (10%) en el área ambiental hecho que refleja su potencial aplicación futura, asimismo, se advirtió **267 publicaciones (3.9%)** en el área de **recursos energético e hídricos**, que corresponde al área de menor aplicación de los revisados, por lo que constituye un campo de aplicación reciente o “nuevo”, toda vez que su aplicación es menor en relación a áreas de aplicación como investigación de operaciones y ciencia de gestión, informática e inteligencia artificial, gerencia y negocios, matemática aplicada, interdisciplinaria entre otros que son de mayor aplicación.

En la **aplicación en el campo de la gestión de recursos hídricos**, existe una amplia gama de enfoques MCA como el **análisis de conjuntos difusos, comparación por pares y métodos de superación** como los más comunes (Hajkowicz & Collins, 2006).

Al respecto, Hajkowicz & Collins, (2006) realizaron una revisión no exhaustiva de **61 artículos** agrupándolos en **métodos “convencionales”** el cual a menudo tiene un software de computadora, metodología ampliamente publicado y considerable aplicación prioritaria. El resto de enfoques y técnicas MCA consideradas **métodos “hechos a la medida”**, donde los investigadores han realizado considerables adaptaciones a los métodos convencionales o han desarrollado nuevas metodologías algunas de ellas en combinación con otros enfoques.

Dentro de los métodos y técnicas MCA revisados, en la Tabla 1 se muestra que la mayor parte de **métodos comúnmente aplicados** en el campo de la gestión de recursos hídricos fueron análisis de conjuntos difusos, programación de compromiso (CP), proceso de jerarquía analítica (AHP), ELECTRE y PROMETHEE.

Tabla 2 Aplicaciones de métodos MCA convencional en recursos hídricos

Categoría de método MCA	Métodos MCA	Número de aplicaciones
Análisis de conjunto difuso	Análisis de conjunto difuso	22
Distancia a punto ideal	Programación de compromiso (CP)	17
Comparación por pares	Proceso de jerarquía analítica (AHP)	15
Métodos de superación	ELECTRE I, II, III, IV y TRI	15
Métodos de superación	PROMETHEE I, II, V	12
Función de valor multicriterio	Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT)	8

Categoría de método MCA	Métodos MCA	Número de aplicaciones
Distancia a punto ideal y método de superación	Análisis Q multicriterio (MCQA I, II y III)	3
Distancia a punto ideal	EXPROM	3
Comparación por pares	MACBETH	1
Ponderado de suma/multiplicación	Suma ponderada	1
Distancia a punto ideal	Ponderado aditivo simple (SAW), programación de compromiso (CP) y técnica para preferencia de orden por similitud a solución ideal (TOPSIS)	1
TOTAL		98

Hajkowicz & Collins, (2006)

En relacion al caso especifico de la aplicación del metodo de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), Thungngern et al, (2015) realizaron una revision de la aplicación AHP, para gestion de recursos naturales desde 2009 a 2013, donde de la revision de 130 articulos se clasificó en 4 categorias: gestión ambiental, recursos de suelo, recursos hidricos y recursos forestales, se encontro una mayor y creciente aplicación en el campo de recursos hidricos tal como puede mostrarse en la Tabla 2 mostrada a continuacion:

Tabla 3 Aplicaciones de método AHP en gestión de recursos naturales de 2009 a 2013

Año	Gestión de recursos naturales				TOTAL
	Gestión ambiental	Recursos de suelo	Recursos hídricos	Recursos forestales	
2009	5	3	4	2	14
2010	6	5	7	2	20
2011	3	8	6	5	22
2012	6	6	12	5	29
2013	8	17	17	3	45
TOTAL	28	39	46	17	130

Thungngern et al, (2015)

De la revisión de aplicación del método AHP para gestion de recursos naturales, los problemas MCA relacionados a recursos hidricos fueron las mas usadas en el metodo AHP, toda vez que la gestión de recursos hídricos es caracterizado por una gran competencia entre diferentes grupos de usos consuntivos de agua, y tambien la presencia de grupos con interés diverso y cada vez mas conflictivo (Thungngern et al, 2015).

Esta creciente aplicación de enfoques MCA en aplicaciones de recursos hídricos, es explicado por Hajkowicz y Collins (2006), quienes exploran brevemente algunas de las razones principales por las que los investigadores adoptaron MCA como herramienta de ayuda para la toma de decisiones.

- Proporciona **transparencia y responsabilidad** a los procedimientos de decisión que de otra manera podrían tener motivos y razones poco claras. La transparencia en MCA se logra al establecer y ponderar explícitamente los criterios de decisión. Las razones para la elección se hacen explícitas y las decisiones pasadas se pueden auditar fácilmente. Sin embargo, si bien la transparencia generalmente se considera una fortaleza de MCA, puede ser un elemento disuasorio para algunos; a veces, quienes toman las decisiones de manera abierta o encubierta, no quieren ser demasiado transparentes.
- La **resolución de conflictos** es una razón común para adoptar MCA. La capacidad de MCA para ayudar en la resolución de conflictos se debe en parte a su transparencia. Se requiere que todas las partes declaren explícitamente sus preferencias a través de un proceso estructurado. Entonces es posible identificar áreas de acuerdo y desacuerdo, manejando así el conflicto (Cai et al, 2004).
- El **compromiso de múltiples partes interesadas y participación de la comunidad** también fueron vistos como razones para adoptar MCA en las decisiones de gestión del agua.
- Otra razón común para adoptar MCA para la gestión del agua es que **MCA utiliza axiomas formales** de la teoría de la decisión para informar la elección. Esto ayuda a garantizar que el análisis sea **lógico y robusto**, asimismo, la adopción de reglas formales puede ayudar con la auditabilidad. Un auditor puede usar un modelo MCA para recrear el problema de decisión en el momento en que se tomaron las decisiones. La **auditabilidad** es otra razón para adoptar un enfoque de MCA.

4.3 Campos de gestión de recursos hídricos enfrentados con MCA

Por otro lado, dentro de la revisión de aplicación MCA en diferentes campos de la gestión de recursos hídricos, se advierte que la mayoría de aplicaciones corresponden a **evaluación de políticas de agua, planeamiento de abastecimiento de agua y selección de infraestructura**, de la revisión de 113 estudios realizados por Hajkowicz & Collins, (2006), comprendido en el periodo de 1973 a 2005, identificaron ocho (8) tipos de aplicaciones MCA, donde el número de artículos por cada una de estas categorías identificadas se muestra en la Figura 4.

De lo anterior, se advierte que se tiene una categoría adicional bajo el término “método en investigación”, que corresponden a investigaciones de exploración de métodos MCA para gestión de agua en base a un nivel teórico, por lo que no se consideraría propiamente una aplicación en un campo específico de la gestión de recursos hídricos.

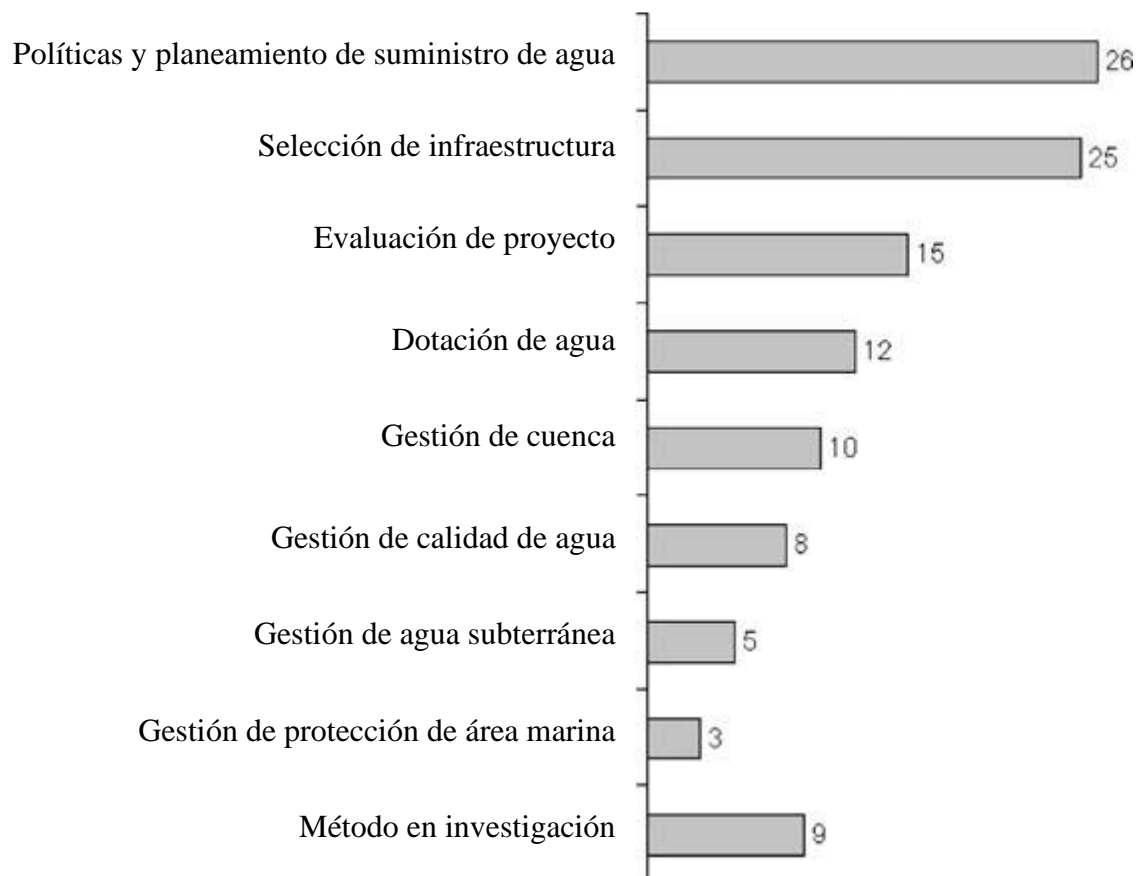


Figura 4 Diferentes tipos de aplicaciones MCA

(Hajkowicz & Collins, 2006).

Por otro lado, Cambrainha & Fontana, (2018) y Hajkowicz & Higgins, (2006), presentan una revisión de estudios de aplicación que usan método MCA en gestión de recursos hídricos, revisión de artículos comprendidos entre el periodo 2004 y 2019, donde se presentan campo de aplicación, problemas de decisión enfrentado y criterios de desempeño o rendimiento considerados que se muestran a continuación.

Tabla 4 Aplicación MCA en campo de **políticas y planeamiento de abastecimiento de agua**

Autores	Método aplicado	Problema de decisión	Criterios de evaluación
Karnib (2004)	Análisis de conjunto difuso	Secuencia de ejecución de proyectos en orden de prioridad en Líbano	Técnica, socio-económica, ambiental y económica con 12 sub criterios

Autores	Método aplicado	Problema de decisión	Criterios de evaluación
Abrishamchi et al. (2005)	CP	Selección de opciones de gestión de agua potable y residual en Zahidan, Irán	Económico, social, salud pública, técnico y sustentabilidad con 9 sub criterios
Chowdhury & Rahman (2008)	MCDA general	Selección de opción de mejora del canal de drenaje natural de Malnichara en Sylhet, Bangladesh	Técnico, económico, ambiental y social con 9 sub criterios
Garfi & Ferrer-Martí (2011)	MCA general	Evaluación de proyectos de agua y saneamiento en países en desarrollo	Técnico, social económico y ambiental con 23 sub criterios
Okeola y Sule (2011)	AHP	Selección de alternativas de gestión de propiedad y operación de abastecimiento de agua en Offa, Nigeria	Ambiental, económico, técnico, institucional y socio-cultural con 19 sub criterios
Garfi et al. (2011)	AHP	Seleccionar el programa más apropiado para suministrar agua en zona árida del valle de Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil	Técnico, social, ambiental, económico y criterios técnicos de abastecimiento de agua con 23 sub criterios
Mutikanga et al. (2011)	PROMETHEE II	Planeamiento estratégico en gestión de pérdidas de agua en redes de distribución en Kampala, Uganda	Financiera-económica, ambiental, salud pública, técnica y socioeconómica con 7 sub criterios
Matrosov et al. (2013)	RDM y teoría de la decisión de la brecha de información (IGDT)	Planeamiento de recursos hídricos, expansión del sistema de suministro de agua potable de Londres	Fiabilidad del servicio, susceptibilidad de almacenamiento, desempeño ambiental, consumo de energía y costo total
Azarnivand & Chitsaz (2015)	AHP, eDPSIR y DEMATEL, COPRAS	Acciones para mitigación de escasez de agua en Yazd, Iran	Crecimiento demográfico, legislación, erosión, declinación disponibilidad de agua dulce, desertificación, salinización, viabilidad operacional, y multiobjetivo
Scholten et al. (2015)	Teoría de utilidad multiatributo (MAUT)	Planificación de alternativas de abastecimiento de agua potable en Mönchaltorfer Aa, Suiza	Equidad intergeneracional, protección de recursos y agua subterránea, abastecimiento de agua, aceptación social y costos
Kumar et al. (2015)	ELECTRE-III-H	Evaluación de alternativas de	Costo, estrés hídrico e impacto ambiental

Autores	Método aplicado	Problema de decisión	Criterios de evaluación
		abastecimiento de agua para uso doméstico, industrial y agrícola en Tarragona, España	
De Almeida-Filho et al. (2016)	MAUT, PROMETHEE II	Planeamiento de acciones de mantenimiento preventivo en sistema de abastecimiento de agua de Recife, Brasil	Sistema de índice de frecuencia de interrupción promedio (SAIFI), confiabilidad, disponibilidad del servicio y costo por ciclo
Ezbakhe & Perez-Foguet (2018)	MAUT y ELECTRE-III	Priorización en agua, saneamiento e higiene zona rural de Kenia	Calidad de agua, tipo de fuente, distancia vivienda a fuente, funcionalidad del abastecimiento, persona responsable del agua, consumo, tipo de instalaciones, inspección sanitaria de suministro y tratamiento de agua en punto de uso

Adaptado de Cambrainha & Fontana, (2018) y Hajkowicz & Higgins, (2006)

De lo anterior el método más recurrente utilizado es AHP, y en su mayor parte relacionado a problemas de planeamiento de abastecimiento de agua potable a la población.

Tabla 5 Aplicación MCA en campo de **Selección de Infraestructura**

Autores	Método aplicado	Problema de decisión	Criterios de evaluación
Amorocho-Daza et al (2019)	Comparación de AHP y MAUT	Seleccionar alternativas para nueva infraestructura de abastecimiento de agua en Santa Marta, Colombia	Tiempo operacional, instalación de infraestructura, riesgo operacional, social y ambiental con 14 sub criterios

Adaptado de Cambrainha & Fontana, (2018) y Hajkowicz & Higgins, (2006)

Tabla 6 Aplicación MCA en campo de **evaluación de proyecto**

Autores	Método aplicado	Problema de decisión	Criterios de evaluación
Chowdhury & Rahman (2008)	MCDA general	Selección de opción de mejora del canal de drenaje natural de Malnichara en Sylhet, Bangladesh	Técnico, económico, ambiental y social con 9 sub criterios

Tabla 7 Aplicación MCA en campo de **dotación de agua**

Autores	Método aplicado	Problema de decisión	Criterios de evaluación
Garfí et al. (2011)	Proceso de jerarquía analítica (AHP)	Seleccionar el programa más apropiado para suministrar agua en zona árida del valle de Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil	Técnico, social, ambiental, económico y criterios técnicos de abastecimiento de agua con 23 sub criterios
Fontana & Morais (2013)	PROMETHEE V	Evaluación de medidas de corrección de redes de distribución de agua	Perdida de agua, costo de implementación, costo de mantenimiento, tiempo de ejecución y tiempo de fiabilidad.
Scholten et al. (2014)	Modelo de valor multiatributo (MAVM)	Rehabilitación de redes de abastecimiento de agua potable en Suiza	Confiabilidad, equidad intergeneracional y costo
Morais et al (2014)	Combinación de SMAA-TRI y ELECTRE-TRI	Clasificación de áreas del sistema ubicadas en zonas críticas de pérdidas de agua en red de distribución en Carnaíba, Pernambuco, Brasil	Presión, edad de la tubería, interferencias, calidad de agua, tipo de consumo, población abastecida, 14 sub criterios
Fontana & Morais (2015)	SMARTER	Segmentación de redes de distribución de agua	Numero de economías, tipo de sector, agua consumida y tarifa.
Fontana & Morais (2016)	SMARTER y programación lineal integral (ILP)	Selección de alternativas de control preventivo de pérdidas de agua en redes de distribución	Costo de implementación, eficiencia, tiempo necesario para resultados, reducción potencial de aguas residual, necesidad de trabajo de expertos y vida útil
Fontana & Morais (2017)	PROMETHEE GDSS	Segmentación de redes de distribución de agua	Costo de implementación de válvulas de aislamiento, numero de segmentos generados, consumo de agua, dificultad implementación y mantenimiento de válvulas de aislamiento, cambio en presión y caudal de red, tipo de economías e impacto de infraestructura
Ilaya-Ayza et al. (2017)	AHP and ILP	Gestión de horario de suministro de agua en red de abastecimiento en Oruro, Bolivia	Presión, número de usuarios, número de horas de abastecimiento y facilidad de operación de los

Autores	Método aplicado	Problema de decisión	Criterios de evaluación
sectores			

Adaptado de Cambrainha & Fontana, (2018) y Hajkowicz & Higgins, (2006)

En relación a lo anterior, en el caso de segmentación de redes no tiene una aplicación específica a un lugar determinado, sino corresponde a un análisis de planteamiento de base teórica.

Tabla 8 Aplicación MCA en campo de **gestión de cuenca**

Autores	Método aplicado	Problema de decisión	Criterios de evaluación
Srdjevic et al. (2004)	TOPSIS, TOPSIS modificado y CP	Evaluación de escenarios para mejora de gestión de uso de dos reservorios multipropósito en cuenca del río Paraguacu, Brasil	Confiabilidad, vulnerabilidad, resiliencia, índice de escasez, rendimiento firme (demanda) y grado de riesgo
Chung & Lee (2009)	AHP, programación compuesta, Régimen, ELECTRE II, EVAMIX	Priorización de gestión de agua en cuenca Anyangcheon, Corea	Cantidad y calidad de agua con 7 sub criterios
Calizaya et al. (2010)	AHP	Priorización de instrumentos de gestión integral de recursos hídricos y actores en la cuenca del lago Poopo, Bolivia	Económico, social y ambiental con 10 sub criterios
Yilmaz & Harmancioglu (2010)	Ponderado aditivo simple (SAW), CP y TOPSIS	Evaluación de planes de gestión de agua superficial para riego en cuenca del río Gediz, Turquía	Económico, social y ambiental con 9 sub criterios
Kim et al. (2013)	Fuzzy TOPSIS	Evaluación de mejores sitios para tratamiento de aguas residuales en Cuenca urbana Anyangcheon en Corea del Sur	Calidad y cantidad de agua con 25 sub criterios.
Cetinkaya & Gunacti (2018)	Enfoque de punto de referencia (RPA)	Gestión de agua (asignación) en la cuenca del río Gediz, costa Egea de Turquía	Social, económico y ambiental con 10 sub criterios
Alamanos et al. (2018)	MAUT, AHP, ELECTRE Y TOPSIS	Estrategias de gestión (escenarios para riego) de recursos hídricos cuenca del lago Karla, Grecia	Balance de agua, beneficio neto, y costo total del agua con 8 sub criterios

Adaptado de Cambrainha & Fontana, (2018) y Hajkowicz & Higgins, (2006)

Es necesario precisar que la información de las tablas anteriores, esta complementada con la revisión bibliográfica realizada en el presente trabajo.

4.4 Criterios de evaluación MCA en gestión de recursos hídricos

Los criterios utilizados con mayor frecuencia están basados en aspectos **social, economico y ambiental**. Por lo tanto, estos son los criterios más importantes y más comunes en la gestión del agua y medio ambiente en el ámbito del desarrollo sostenible (Zarghami & Szidarovszky, 2011).

Criterio social

El bienestar social es el objetivo fundamental de cada plan de desarrollo de recursos hídricos y el desempeño social de cualquier proyecto tiene un gran efecto en la vida de la sociedad. Algunos aspectos sociales y externalidades importantes de los proyectos relacionados a recursos hídricos se pueden enumerar de la siguiente manera:

- Considerar la equidad en la asignación de recursos hídricos es muy importante. Las regiones altas de una cuenca deben tratarse de la misma manera que las partes bajas y viceversa, de lo contrario surgirán conflictos sociales. Esta equidad promoverá el consenso público y la participación, lo cual es vital para el éxito de un proyecto.
- Los titulares de derechos de agua tradicionales son muy sensibles para mantener sus derechos. Se desarrollarán graves conflictos sociales si un plan de agua viola los tratados ya firmados. Las nuevas transferencias de agua también deberían satisfacer a estas personas, de lo contrario se opondrán al plan.
- Los nuevos planes ambientales y de agua deben ser consistentes con las costumbres culturales y religiosas de las personas.
- La construcción de reservorios, las tuberías de transferencia de agua o la restauración de llanuras de inundación siempre requieren que algunas personas se reubiquen de sus hogares, lo que resulta en varias tensiones mentales y emocionales. Por lo tanto, los proyectos con menos reasentamiento son más preferidos.
- Las construcciones de presas y sus instalaciones correspondientes pueden dañar sitios históricos como edificios patrimoniales. Este daño tiene que mantenerse en un nivel mínimo.

Los criterios sociales son muy importantes. Sin embargo, su modelado suele ser muy

difícil ya que se evalúan y miden solo con datos cualitativos sin medidas cuantitativas.

Criterio económico

Los criterios económicos son las medidas básicas para evaluar la sostenibilidad de los proyectos alternativos de recursos hídricos. Existen medidas útiles para cuantificar los resultados económicos y financieros de un proyecto en su período de operación. Por ejemplo, podemos maximizar la diferencia de beneficios totales de un proyecto y sus costos. Este análisis se basa en dos conceptos económicos de escasez y sustitución (Loucks & Van Beek, 2005). Dado que los diversos recursos son limitados, las personas están dispuestas a pagar por ellos, por lo tanto, deben utilizarse de manera eficiente. En lugar de usar la diferencia de beneficio y costo, también se puede usar la relación de beneficio a costo. En estos casos, la cantidad de beneficio o costo no es importante en sí misma, ya que solo su diferencia o relación es importante. Otra medida para evaluar las alternativas de inversión es la tasa interna de rendimiento, que es la tasa de interés a la que el costo total de la inversión es igual al beneficio de la inversión.

En la mayoría de los proyectos multipropósito de agua y medio ambiente, las compensaciones deben considerarse con respecto a los criterios económicos. Como ejemplo, si consideramos un acuífero en alta mar que se puede extraer para riego. Una mayor extracción reducirá la capa freática, lo que provocará una intrusión de agua de mar. La intrusión de agua salada puede destruir la calidad del agua, lo que puede resultar en menos área agrícola.

Criterio ambiental

En los últimos años, los recursos hídricos fueron severamente dañados debido a su uso insostenible. En el futuro, la situación podría empeorar debido a las crecientes demandas y algunos otros factores como el impacto del cambio climático. Degradarán la condición de los ríos, lagos, suministro de agua subterránea y humedales. Esto requiere la consideración de criterios ambientales en toda toma de decisiones. Algunos de los factores importantes, que deben considerarse en la planificación de los recursos hídricos y los proyectos ambientales, son los siguientes (mencionado por Zarghami & Szidarovszky, (2011) de la publicación del Banco Mundial 2007):

- Pérdida de hábitat acuático y eliminación de especies.
- Degradación de la calidad del agua en términos de agotamiento de oxígeno, carga de nutrientes, turbidez elevada, descarga de contaminantes en el efluente y riesgo de contaminación del agua subterránea.
- Cambio de los regímenes hidrológicos, déficit de la capa freática, intrusión de agua salada en los suministros de agua subterránea y superficial.
- Algunos problemas, como la erosión del suelo y su inestabilidad, el hundimiento de la tierra debido al bombeo adicional de agua subterránea, tienen efectos crecientes en enfermedades humanas, animales y agrícolas debido a las estaciones de crecimiento prolongadas.

4.5 Aplicación MCA en combinación o integración con otros métodos

La aplicación de métodos y técnicas MCA consideradas **métodos “hechos a la medida”**, donde los investigadores han realizado considerables adaptaciones a los métodos convencionales o han desarrollado nuevas metodologías, corresponden también a una integración de aplicación MCA en combinación con otros métodos que se desarrollan para mejor eficiencia de la evaluación de problemas de decisión multicriterio.

De la revisión de aplicación MCA en combinación con otros métodos, metodologías y técnicas se encontró que en el caso específico de aplicación de **método AHP** fue frecuentemente el más aplicado en combinación con otros métodos, más que como herramienta única.

AHP es más frecuentemente combinado con **GIS**, que es una herramienta poderosa para análisis espacial y estadístico y manejo de capas con información, esencial en planeamiento y gestión de recursos hídricos, AHP es combinado con la técnica **PROMETHEE**, Proceso de red analítica (ANP) entre otros, estas técnicas pueden complementar el enfoque AHP y mejorar su efectividad en la evaluación de problemas de decisión en el campo de la gestión de recursos hídricos.

En relación al uso de MCA integrado con GIS, Qashqo (2018), presenta una integración de GIS y análisis de decisión multicriterio (MCDM) para encontrar localizaciones potenciales de puntos de distribución de agua comunales en un caso de estudio en Lapilang y Suspa en Nepal; según el autor, los resultados confirman la necesidad de futuras investigaciones y esfuerzos intensivos para integrar GIS y MCA en soportes de

toma de decisión; esta integración sería de gran ayuda en el contexto humanitario, especialmente en el desarrollo de medidas proactivas en respuesta inmediata a desastres según el estudio de caso evaluado por dicho autor.

De otro lado también Cole et al, (2018), evaluaron un enfoque estructurado de combinación que integra entre otros el método triple resultado final (TBL) y análisis de decisión multicriterio (MCDA) denominado en el estudio modelo **TBL-MCDA**, esta integración en principio ayudaría a **refinar el conjunto factible de alternativas** para proveer más transparencia en el manejo, tecnologías, y personas involucradas influenciando la decisión, asimismo, asegura un mejor balance entre rendimiento financiero, social y ambiental en el análisis de decisión.

En dicho estudio se mostró un incremento del número de participantes, incrementó la interacción entre participantes, cambio la estructura del problema de decisión, incrementó el número considerado de indicadores de desempeño o rendimiento, en suma el proceso de participación ágil incrementó el número y diversidad de participantes que estuvieron envueltos en el estudio e incremento el conocimiento compartido entre participantes, esto permitió darle un enfoque más holístico a los procesos de decisión.

Asimismo, Hajkowicz & Collins, (2006), señalan la combinación de enfoque **MCA con análisis de costo beneficio (BCA)** donde cita a Bana e Costa y col. (2004), Joubert et al. (1997) y Prato (1999) quienes abogan por la adopción de MCA para complementar el análisis de costo de beneficio (BCA). Toda vez que las dos limitaciones principales de BCA identificadas por estos autores son: (a) un requisito para que todos los resultados se expresen en unidades monetarias y; (b) dificultades para lograr una distribución justa de los recursos entre las partes interesadas. Las decisiones de gestión del agua suelen tener importantes factores no financieros e intereses de múltiples partes interesadas. El marco de MCA asegura un **análisis robusto** al tiempo que permite incorporar cuestiones **no financieras** y de distribución.

En relación a lo anterior, Joubert et al, 1997, indica que no es que BCA nunca sea apropiado, al contrario, a nivel del sector privado, y donde los costos y beneficios son claros, es una herramienta bien establecida, incluso a nivel de impactos sociales y la toma de decisiones, si los valores monetarios están disponibles y son conceptualmente aceptables, por lo tanto, el uso de CBA y MCDA como herramientas complementarias parece mas apropiado.

4.6 Retos de MCA aplicados a recursos hídricos

De otro lado, si bien es cierto las metodologías MCA han demostrado ser de gran ayuda para los tomadores de decisiones en muchos campos de la gestión de recursos hídricos, existen varias fuentes de incertidumbre en la aplicación de métodos y enfoques MCA, incluye por ejemplo la definición de pesos de criterios y asignación de valores de rendimiento o desempeño de criterios (Hyde, Maier, & Colby, 2004).

Muchos investigadores enfatizan que un verdadero desafío al modelar problemas MCA es cómo incorporar la **incertidumbre** de los datos de entrada. Los modelos y enfoques MCA para la gestión del agua y medio ambiente, similares a muchas áreas, enfrentan incertidumbres que generalmente surgen de **dos fuentes: incertidumbre aleatoria o probabilística** relacionada con datos ambientales, económicos o técnicos, e **incertidumbre difusa** relacionada con **juicios subjetivos** y características de los tomadores de decisión (DM). Al considerar la incertidumbre, el análisis de decisión se vuelve más difícil, pero al ignorarlo podríamos perder la realidad (Zarghami & Szidarovszky, 2011).

En relación a lo anterior, Madani & Lund (2011), presentan un enfoque de la teoría de juegos de Montecarlo (MCGT) para resolver problemas de MCA cuando existe incertidumbre en el desempeño de las alternativas. A través de una **simulación de Monte-Carlo**, el problema estocástico de MCA se mapea en un entorno determinista, donde se generan muchos problemas de MCA, se convierten en juegos estratégicos y se resuelven utilizando conceptos de teoría de juegos no cooperativos. Luego, los resultados se asignan al entorno estocástico y se asocian con probabilidades de informar a los tomadores de decisión (DM) sobre los efectos de la incertidumbre existente sobre los resultados.

Se debe precisar que la mayoría de los métodos MCA asumen una cooperación perfecta entre los tomadores de decisión (DM) para encontrar las soluciones óptimas del sistema. Sin embargo, la teoría de juegos también puede considerar casos en los que los responsables de la toma de decisiones tienen tendencias de auto optimización, no están dispuestos a cooperar y dan prioridad a sus propios objetivos. Como enfoque descriptivo, el **método MCGT** puede describir posibles cambios en el juego y predecir los resultados finales, cuando las partes están dispuestas o no a cooperar. Como método normativo, MCGT puede aplicarse para establecer soluciones estables no dominadas. En el último

caso, el análisis se limita a posibles resultados cooperativos, donde las partes están dispuestas a cooperar y mejorar juntas.

Ezbakhe & Perez-Foguet (2018) presentan un estudio de análisis de decisión multi criterio (MCDA), bajo incertidumbre de datos, donde presentan una comparación de aplicación de dos enfoques para incorporar incertidumbre de datos en modelos MCDA (MAUT y ELECTRE-III), aplicado al caso de estudio de planeamiento de acceso a agua segura, sanitaria e higiene en zona rural de Kenya; la comparación está enfocada a la forma como estos dos modelos se manejan bajo incertidumbre en datos disponibles. El análisis mostró que mientras ambos métodos incorporan incertidumbre de datos en una manera considerablemente diferente, alcanzan a una priorización similar.

De otro lado, Ganjali & Guney (2017) basado en la revisión de 65 artículos GIS-MCDA realizado por Malczewski, realiza una clasificación de acuerdo al tipo de incertidumbre, siendo el determinístico el más empleado, tal como se muestra en la Tabla siguiente:

Tabla 9 Clasificación de publicaciones GIS-MCDA de acuerdo al tipo de incertidumbre

	Tipo de incertidumbre						Total	
	Determinístico		Probabilístico		Fuzzy			
Multi atributo, multi objetivo	52	80%	5	7.7%	8	12.3%	65	100%

Adaptado de Ganjali & Guney (2017)

La complejidad de modelamiento multi objetivo es quizás la mayor razón para un muy limitado uso de técnicas de optimización multi objetivo en el soporte de toma de decisión basado en GIS.

Por otro lado, en reconocimiento de las limitaciones de los enfoques y métodos tradicionales de MCA aplicados a gestión de recursos naturales, que incluye los recursos hídricos, se puede mencionar dos enfoques utilizados para superar estas limitaciones.

4.6.1 Enfoques de sistemas blandos y paradigmas alternativos

Según refiere Mendoza & Martins (2006) varios autores propusieron un paradigma alternativo, descrito como **métodos de “sistemas blandos”** denominados en otros casos como **métodos de investigación de operaciones blandas (OR)**, o sencillamente **Soft-(OR)**, para abordar lo que describieron como “malvado”,

“desordenado”, problemas mal estructurados o difíciles de definir. Estos **paradigmas alternativos** se caracterizan por: (1) buscar soluciones alternativas, no necesariamente óptimas, pero aceptables; (2) menores demandas de datos a través de una mayor integración de datos duros y blandos, incluido juicios sociales; (3) simplicidad y transparencia; (4) tratamiento de personas como sujetos activos; (5) facilitación de la planificación de abajo hacia arriba; (6) aceptación de la incertidumbre guiada por los intentos de mantener abiertas las opciones a medida que se revelan gradualmente diversas sutilezas del problema.

En general, los enfoques de sistemas blandos dan menos énfasis a la generación de soluciones; en cambio, dan prioridad a la definición de factores, perspectivas y problemas más relevantes que deben tenerse en cuenta, y al diseño de estrategias donde el problema se puede entender mejor y guiar mejor el proceso de decisión. Reconocen la naturaleza intrínsecamente compleja de los sistemas sociales y, en consecuencia, intentan evitar la noción prematura de imposición de objetividad, racionalidad, mecanicidad y causalidad predecible entre los componentes relevantes del problema.

Dos características que son centrales para el enfoque de sistemas blandos son la **facilitación** y **estructuración**. El objetivo de la **facilitación** es proporcionar un entorno en el que los participantes o partes interesadas se guíen adecuadamente y las discusiones o debates se canalicen adecuadamente. La **estructuración**, por otro lado, se refiere al proceso con el que se organiza el problema de gestión de manera que las partes interesadas o participantes puedan comprender y, por tanto, participar en los procesos de planificación y toma de decisiones.

Al respecto, **Soft- (OR)** abarca ambos procesos, al tiempo de facilitar un proceso de decisión transparente y participativa, donde llevan el análisis a una representación más formalizada del problema, particularmente el desarrollo de **modelos estructurados** que brindan un enfoque y lenguaje para la discusión. Mendoza & Martins (2006) menciona que Rosenhead (1989) llama a este paradigma alternativo **enfoque de "estructuración de problemas"**.

Una de las fortalezas de los métodos Soft-OR aplicados al manejo de los recursos naturales, incluido los recursos hídricos, es la capacidad que ofrecen para estructurar y proporcionar una mejor comprensión de los problemas complejos en situaciones

de poca información.

4.6.2 Enfoque integrado para el modelado participativo

Mendoza & Martins (2006), señalan que para proponer una nueva forma de pensar acerca de MCA aplicado a la planificación estratégica de la gestión de los recursos naturales, la palabra clave es **integración**, la vinculación de un enfoque cualitativo con la estructuración de problemas que enfatiza aspectos sociales, con un enfoque estructurado que conserva algunas de las capacidades analíticas del "enfoque de sistemas duros", es uno de los aspectos clave de un enfoque integrado. Una ventaja de un **enfoque integrado** es su capacidad para abarcar las fortalezas de cada método. El método cualitativo de sistemas blandos permite un proceso de toma de decisiones más participativo con participación y compromiso de los interesados. Por otro lado, el **enfoque cuantitativo** y estructurado del proceso de toma de decisiones es más sistemático y análisis más objetivos.

Una ventaja del enfoque integrado, es que los tomadores de decisiones no solo brindan información al modelo, sino que también contribuyen al proceso de modelado al involucrarse en la identificación de componentes, dinámicas o procesos del modelo y entre los componentes del modelo y sus relaciones.

También se puede lograr una **integración dinámica** utilizando un acoplamiento más estricto de MCA con modelado participativo. Mendoza y Prabhu (2002) (Mendoza & Martins, 2006) ejemplificaron la integración de los métodos MCDM (utilizados para agregar los impactos acumulativos de los "factores contribuyentes" en un sistema forestal comunitario) con un modelo dinámico de sistema blando cualitativo. Por ejemplo, un modelo asistido por computadora llamado Co-View (Collaborative Vision Exploration Workbench) desarrollado por el Centro de Investigación Forestal Internacional se utilizó para desarrollar un enfoque dinámico de modelado de sistemas cualitativos.

4.7 Futuras direcciones de MCA aplicados a recursos hídricos

Mendoza & Martins (2006) señalan que Belton y Stewart (2002) también sugirieron que el camino a seguir para MCA es lograr una integración más fuerte de la teoría y práctica. Propusieron una "**hibridación**" de metodologías que crearán oportunidades para la acumulación "**sinérgica**" de ideas de los diferentes métodos. Señalaron que un marco

de integración debe identificar elementos comunes entre las metodologías y resaltar las fortalezas de cada método. Dicha integración puede conducir a lo que llaman Meta-MCDA. Esta integración de métodos también es una dirección potencial para futuras investigaciones (Kangas et al, 2001).

Por otra parte, Mingers (2000) aporta argumentos para combinar métodos de sistemas blandos (cualitativos) y duros (cuantitativos). Rosenhead y Mingers (2001) (Mendoza & Martins, 2006) identificaron cuatro tipos generales de marcos de metodologías múltiples como sigue: **combinación de metodología**, donde utiliza dos o más metodologías dentro de una intervención; **mejora de la metodología**, donde utiliza una metodología principal, pero la mejora mediante la importación de métodos en otro lugar; **metodología de paradigma único**, donde combina partes de varias metodologías, todas del mismo paradigma; **multi-paradigma o multi-metodología**, donde utiliza métodos de diferentes paradigmas.

A medida que la aplicación de MCA en la gestión de los recursos hídricos crece, se han desarrollado cientos de métodos desde la década de 1960. Sin embargo, los esfuerzos en la investigación de recursos hídricos MCA ahora están cambiando hacia **desafíos** descritos a continuación (Hajkowicz & Collins, 2006):

- Mejora de la interacción del tomador de decisiones con los modelos de MCA, incluidos mejores métodos para la obtención de preferencias. Esto ha sido abordado en un estudio de Mustajoki et al. (2004), que utiliza un software de soporte de decisiones llamado Web-HIPRE para obtener las preferencias de las partes interesadas a través del uso de la Web (Mustajoki et al, 2004).
- Desarrollar mejores medios para incorporar la entrada de múltiples tomadores de decisiones a una sola decisión y resolver conflictos. El trabajo reciente de Cai et al. (2004) propone un algoritmo de Tchebycheff que implica la construcción de escenarios ampliamente aceptables que se filtran progresivamente para comprometer las soluciones.
- Formas mejoradas para la **estructuración** inicial del modelo MCA, que implica la selección de criterios y opciones de decisión. Mingers y Rosenhead (2004) describen varios métodos de estructuración de problemas (PSM) que podrían aplicarse en las primeras etapas de la MCA (Mingers & Rosenhead, 2004).
- Mejores formas de manejar el **riesgo e incertidumbre** en los modelos de MCA, incluidos los medios para incorporar las preferencias de riesgo de los tomadores de

decisiones. En trabajos recientes, Hyde et al. (2004) proponen un enfoque de MCA basado en la confiabilidad que involucra simulación Monte Carlo y coeficientes de correlación de rango.

Estas necesidades de investigación se pueden resumir como un requisito para integrar de manera más significativa MCA en las decisiones reales de gestión del agua. En otras palabras, los algoritmos para MCA son probablemente lo suficientemente buenos, ahora necesitamos aplicarlos. Esto requerirá una comprensión más profunda de los procedimientos de decisión individual, grupal y organizacional en la gestión de los recursos hídricos.

5. CONCLUSIONES

En la gestión de recursos hídricos, es habitual enfrentarse con problemas de criterios múltiples que requieren la aplicación de métodos de análisis multicriterio (MCA) integrados en una herramienta de apoyo para la toma de decisiones adecuada.

Las principales razones por las que los investigadores adoptaron MCA como herramienta de ayuda para la toma de decisión en gestión de recursos hídricos son transparencia, resolución de conflictos, compromiso de partes interesadas y participación, rigor analítico y auditabilidad.

La mayoría de problemas de decisión enfrentado con enfoques y métodos MCA corresponden a evaluación de políticas de agua, planeamiento de suministro de agua, selección de infraestructura y evaluación de proyectos, con el uso de criterios recurrentes de índole económico, social, técnico y ambiental.

Las futuras tendencias de aplicación MCA, se podrían agrupar en tres marcos de referencia como combinación o integración de enfoques y métodos, mejora de metodología y metodología de paradigma único.

Muchos investigadores consideran que el principal reto en problemas MCA, es incorporar la incertidumbre de los datos de entrada, toda vez que, los modelos y enfoques MCA para la gestión del agua, enfrentan incertidumbres que generalmente surgen de incertidumbre aleatoria y difusa, que en casos particulares se han “mejorado” empleando la simulación de Monte-Carlo, enfoques de sistemas blandos, paradigmas alternativos, enfoques integrados entre otros.

Existen distintos enfoques y métodos MCA de aplicación más usual destacando el análisis de conjuntos difusos, programación de compromiso (CP), proceso de jerarquía analítica (AHP), ELECTRE y PROMETHEE, asimismo, existen métodos de aplicación a medida que combinan métodos y enfoques.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., Tajrishi, M., & Mariño, M. A. (2005). Case Study: Application of Multicriteria Decision Making to Urban Water Supply. *Water Resources Planning and Management*, 131(4), 326–335. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:4(326)
- Alamanos, A., Mylopoulos, N., Loukas, A., & Gaitanaros, D. (2018). An Integrated Multicriteria Analysis Tool for Evaluating Water Resource Management Strategies. *Water*, pág. 1. doi:10.3390/w10121795
- Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)* (International Series in Operations Research & Management Science ed., Vol. 277). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9
- Amorocho-Daza, H., Cabrales, S., Santos, R., & Saldarriaga, J. (2019). A New Multi-Criteria Decision Analysis Methodology for the Selection of New Water Supply Infrastructure. *Water*, págs. 1-23. doi:10.3390/w11040805
- Azarnivand, A., & Chitsaz, N. (2015). Adaptive policy responses to water shortage mitigation in the arid regions: a systematic approach based on eDPSIR, DEMATEL, and MCDA. *Environ Monit Assess*, 1-15. doi:10.1007/s10661-014-4225-4
- Bana e Costa, C. A., & Vansnick, J.-C. (1997). Applications of the MACBETH Approach in the Framework of an Additive Aggregation Model. *Multi-Criteria Decision Analysis*, 6, 107-114. doi:https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199703)6:2<107::AID-MCDA147>3.0.CO;2-1
- Cai, X., Lasdon, L., & Michelsen, A. M. (2004). Group Decision Making in Water Resources Planning Using Multiple Objective Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 4-14. doi:10.1061/~ASCE!0733-9496~2004!130:1~4!
- Calizaya, A., Meixner, O., Bengtsson, L., & Berndtsson, R. (2010). Multi-criteria Decision Analysis (MCDA) for Integrated Water Resources Management (IWRM) in the Lake Poopo Basin, Bolivia. *Water Resour Manage*, 2267–2289. doi:10.1007/s11269-009-9551-x

- Cambrainha, G. M., & Fontana, M. E. (2018). A multi-criteria decision making approach to balance water supply-demand strategies in water supply systems. *Production*(28), 13. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.20170062>
- Cetinkaya, C. P., & Gunacti, M. C. (2018). Multi-Criteria Analysis of Water Allocation Scenarios in a Water Scarce Basin. *Water Resour Manage*, págs. 1-18. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1963-z>
- Chen, Y. (2006). *Multiple Criteria Decision Analysis: Classification Problems and Solutions*. Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo.
- Chowdhury, R. K., & Rahman, R. (2008). Multicriteria decision analysis in water resources management: the malnichara channel improvement. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 195-204. doi:10.1007/BF03326013
- Chung, E.-S., & Lee, K. S. (2009). Prioritization of water management for sustainability using hydrologic simulation model and multicriteria decision making techniques. *Environmental Management*, 1502–1511. doi:doi:10.1016/j.jenvman.2008.10.008
- Cole, J., Sharvelle, S., Grigg, N., Pivo, G., & Haukaas, J. (2018). Collaborative, Risk-Informed, Triple Bottom Line, Multi-Criteria Decision Analysis Planning Framework for Integrated Urban Water Management. *Water*, págs. 1-21. doi:10.3390
- De Almeida-Filho, A. T., Monte, M. B., & Morais, D. C. (2016). A Voting Approach Applied to Preventive Maintenance Management of a Water Supply System. *Group Decis Negot*, 1-24. doi:10.1007/s10726-016-9512-8
- Ezbakhe, F., & Perez-Foguet, A. (2018). Multi-Criteria Decision Analysis Under Uncertainty: Two Approaches to Incorporating Data Uncertainty into Water, Sanitation and Hygiene Planning. *Water Resources Management*, págs. 5169–5182. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-018-2152-9>
- Fontana, M. E., & Morais, D. C. (2013). Using PrometheeV to Select Alternatives so as to Rehabilitate Water Supply Network with Detected Leaks. *Water Resour Manage*. doi:10.1007/s11269-013-0393-1
- Fontana, M. E., & Morais, D. C. (2015). Modelo para setorizar redes de distribuição de água baseado nas características das unidades consumidoras. *Produccion*, 25(1), 43-156. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132013005000071>
- Fontana, M. E., & Morais, D. C. (2016). Decision model to control water losses in distribution networks. *Production*, 688-697. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.201815>
- Fontana, M. E., & Morais, D. C. (2017). Water distribution network segmentation based on group multi-criteria decision approach. *Production*, 27. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.208316>

- Ganjali, N., & Guney, C. (2017). GIS and Game Theory for Water Resource Management. (4. I. Workshop, Ed.) *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4/W4, 215-220. doi:doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-215-2017
- Garfi, M., & Ferrer-Martí, L. (2011). Decision-making criteria and indicators for water and sanitation projects in developing countries. *Water Science & Technology*, 83-101. doi:10.2166/wst.2011.543
- Garfi, M., Ferrer-Martí, L., Bonoli, A., & Tondelli, S. (2011). Multi-criteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programmes. A case study in semi-arid region of Brazil. *Environmental Management*, 665-675. doi:10.1016/j.jenvman.2010.10.007
- Government, Department for Communities and Local. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*. London: Communities and Local Government Publications.
- Greco, S., Ehrgott, M., & Figueira, J. R. (2016). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (Second Edition ed.). Berlin Heidelberg New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4939-3094-4
- Hajkowicz, S., & Collins, K. (2006). A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. *Water Resour Manage*, págs. 1553–1566. doi:10.1007/s11269-006-9112-5
- Hajkowicz, S., & Higgins, A. (2006). A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *European Journal of Operational Research*, págs. 255-265. doi:10.1016/j.ejor.2006.10.045
- Harris, R. (2012). *VirtualSalt*. Obtenido de Introduction to Decision Making, Part 1: <https://www.virtualsalt.com/crebook5.htm>
- Hyde, K. M., Maier, H. R., & Colby, C. B. (2004). Reliability-Based Approach to Multicriteria Decision Analysis for Water Resources. *Water Resources Planning and Management-ASCE*, págs. 429-438. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:6(429)
- Hyde, K., Maier, H., & Colby, C. (2005). A distance-based uncertainty analysis approach to multi-criteria decision analysis for water resource decision making. *Environmental Management*, págs. 278-290.
- Ilaya-Ayza, A. E., Benítez, J., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2017). Multi-criteria optimization of supply schedules in intermittent water supply systems. *Computational and Applied Mathematics*, 695–703. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cam.2016.05.009
- Joubert, A. R., Leiman, A., de Klerk, H. M., Katua, S., & Aggenbach, J. C. (1997). Fynbos

- (fine bush) vegetation and the supply of water: a comparison of multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis. *Ecological Economics*, 22, 123-140.
- Kangas, J., Kangas, A., Leskinen, P., & Pykalainen, J. (2001). MCDMMethods in Strategic Planning of Forestry on State-Owned Lands in Finland: Applications and Experiences. *Multi-criteria Decision Analysis*, 257–271. doi:10.1002/mcda.306
- Karnib, A. (2004). An Approach to Elaborate Priority Preorders of Water Resources Projects Based on Multi-Criteria Evaluation and Fuzzy Sets Analysis. *Water Resources Management*, 13-33.
- Kim, Y., Chung, E.-S., Jun, S.-M., & Kim, S. U. (2013). Prioritizing the best sites for treated wastewater instream use in an urban watershed using fuzzy TOPSIS. *Resources, Conservation and Recycling*, 23-32. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.009>
- Kumar, V., Del Vasto-Terrientes, L., Valls, A., & Schuhmacher, M. (2015). Adaptation strategies for water supply management in a drought prone Mediterranean river basin: Application of outranking method. *Science of the Total Environment*, 1-14. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.062>
- Lai, Y.-J., Liu, T.-Y., & Hwang, C.-L. (1994). Theory and Methodology: TOPSIS for MODM. *European Journal of Operational Research*, 486-500. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90282-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90282-8)
- Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management: an Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin: UNESCO.
- Madani, K., & Lund, J. R. (16 de february de 2011). A Monte-Carlo game theoretic approach for Multi-Criteria Decision Making under uncertainty. *Advances in Water Resources*, págs. 607–616. doi:10.1016/j.advwatres.2011.02.009
- Matrosov, E. S., Woods, A. M., & Harou, J. J. (2013). Robust Decision Making and Info-Gap Decision Theory for water resource system planning. *Hydrology*, 43-58. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.006>
- Mendoza, G. A., & Martins, H. (2006). Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management*, págs. 1-22. doi:10.1016/j.foreco.2006.03.023
- Mingers, J. (2000). Variety is the spice of life: combining soft and hard OR/MS methods. *Internacional Transactions in Operationl Research*, 673-691.
- Mingers, J., & Rosenhead, J. (2004). Problem structuring methods in action. *European Journal of Operational Research*, 530–554. doi:10.1016/S0377-2217(03)00056-0
- Morais, D. C., De Almeida, A. T., & Figueira, J. R. (2014). A Sorting Model for Group Decision Making: A Case Study of Water Losses in Brazil. *Group Decis Negot*, 937–

- Mustajoki, J., Hamalainen, R. P., & Marttunen, M. (2004). Participatory multicriteria decision analysis with Web-HIPRE: a case of lake regulation policy. *Environmental Modelling & Software*, 537–547. doi:10.1016/j.envsoft.2003.07.002
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2011). Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management. *Water Resour Manage*, págs. 3947–3969. doi:10.1007/s11269-011-9896-9
- Mysiak, J., Giupponi, C., & Rosato, P. (2005). Towards the development of a decision support system for water resource management. *Environmental Modelling & Software*, 203–2014. doi:10.1016/j.envsoft.2003.12.019
- Qashqo, B. (2018). *GIS-based multi-criteria decision analysis for identifying water distribution points: a case study in Lapilang & Suspa regions, Nepal*. Vienna: University of Salzburg.
- Ringuest, J. L. (1992). *Multiobjective Optimization: Behavioral and Computational Considerations*. New York: Springer Science+Business Media. doi:10.1007/978-1-4615-3612-3
- Saaty, R. W. (1987). The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used. *Mathl Modelling*, 9(3-5), 161-176.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2013). *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks* (Second ed., Vol. 195). New York: Springer Science+Business Media. doi:10.1007/978-1-4614-7279-7
- Sadoff, C., & Muller, M. (Marzo de 2010). La Gestión del Agua, la Seguridad Hídrica y la Adaptación al Cambio Climático: Efectos Anticipados y Respuestas Esenciales. *Tec Background Papers*(14), 19.
- Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M., & Lienert, J. (2014). Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research*, 124-143. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.017>
- Scholten, L., Schuwirth, N., Reichert, P., & Lienert, J. (2015). Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis: An application to water supply infrastructure planning. *Operational Research*, 243-260. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.044
- Serrat-Capdevila, A., Valdes, J. B., & Gupta, H. V. (2011). Decision Support Systems in Water Resources Planning and Management: Stakeholder Participation and the Sustainable Path to Science-Based Decision Making. (I. C. ICIWaRM-UNESCO, Ed.) *Efficient Decision Support Systems - Practice and Challenges From current to*

- future*, págs. 423-439. doi:DOI 10.1016/j.jhydrol.2007.08.028
- Srdjevic, B., Medeiros, Y., & Faria, A. (2004). An Objective Multi-Criteria Evaluation of Water Management Scenarios. *Water Resources Management*, 35–54.
- Thungngern, J., Wijitkosum, S., Sriburi, T., & Sukhsri, C. (2015). A Review of the Analytical Hierarchy Process (AHP): An Approach to Water Resource Management in Thailand. *Applied Environmental Research*, págs. 13-32.
- UNESCO. (2003). *Agua para todos, Agua para la vida, Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*. Organización de la Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, (UNESCO). Paris, Francia: Traducido por Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Wallenius, J., Dyer, J. S., Fishburn, P. C., Steuer, R. E., Zionts, S., & Deb, K. (2008). Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead. *Management Science*, 54(7), págs. 1336–1349. doi:10.1287/mnsc.1070.0838
- Weng, S., Huang, G., & Li, Y. (2010). An integrated scenario-based multi-criteria decision support system for water resources management and planning – A case study in the Haihe River Basin. *Expert Systems with Applications*.
- Yilmaz, B., & Harmancioglu, N. B. (2010). Multi-criteria decision making for water resource management: a case study of the Gediz River Basin, Turkey. *Water SA*, págs. 563-576.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 338--35. doi:[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zarghami, M., & Szidarovszky, F. (2011). *Multicriteria Analysis: Applications to Water and Environment*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin. doi:10.1007/978-3-642-17937-2